

## Virtuelle Wellen und akustische Bildgebung

Gerd Heinz, Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik (GFal), Berlin

### Zusammenfassung

An der GFal wird seit 1994 eine Technik zur passiven bildgebenden Darstellung von Schallquellen entwickelt. Damit wurden in den Jahren 1994 bis 1997 weltweit erste Schallbilder und Filme akustischer Objekte im Niederfrequenzbereich entwickelt. Seit 2001 sind akustische Kameras kommerziell verfügbar. Die seit 1997 als „Akustische Kamera“ bezeichneten Systeme erfreuen sich insbesondere in der Motorentwicklung der Autoindustrie großer Beliebtheit. Inzwischen sind über 50 Systeme weltweit im Einsatz, Tendenz steigend. In Deutschland existiert ein Dienstleister-Netzwerk [1]. Im Beitrag werden kurz die Grundlagen des Verfahrens sowie Applikationen der mehrfach preisgekrönten Technik vorgestellt.

Im Gegensatz zur traditionellen Akustik ist der hier dargestellte Ansatz eine physikalische Interpretation neuronaler Netze (später wurden die physikalisch orientierten, neuronalen Netze in Interferenznetze umbenannt, um Verwirrung zu vermeiden).

Daher läuft die Berechnung im Zeitbereich. Nichtlineare Transferfunktionen prägen anstelle von Wellenzahlen den Beginn. 1994 konnte ich mit acht Kanälen das erste akustische Standbild [2] entwickeln.



Abb.1: Blau gleich leise und rot gleich laut: Das Schallbild eines Windkraftwerkes zeigt aus einer Entfernung von 150 Metern nur noch die Schallemission der Flügelspitzen. Mit den Ohren können wir aus dieser Entfernung kaum noch ein Geräusch vernehmen, die Emission liegt unter der Rauschgrenze

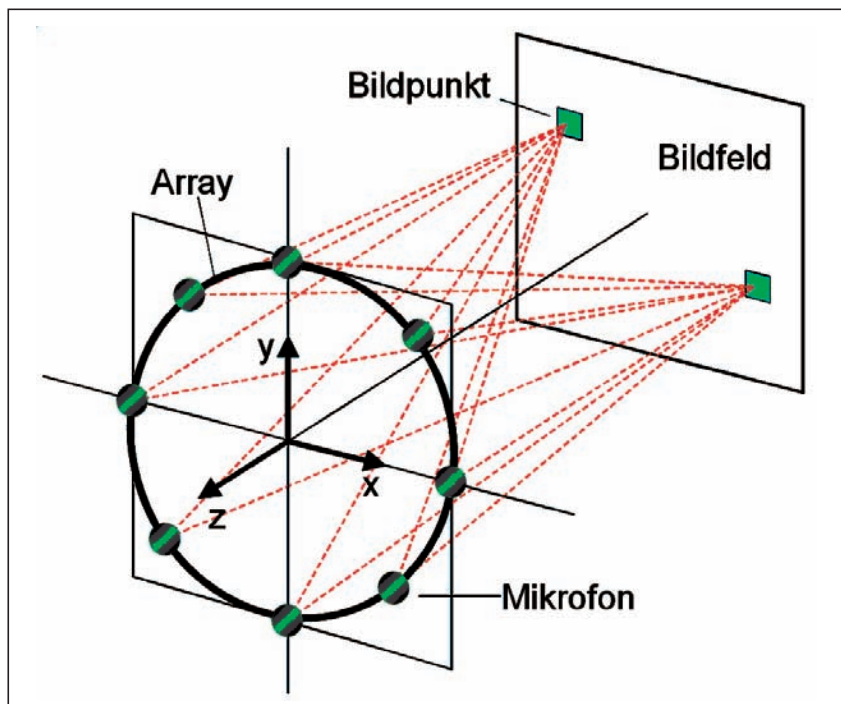


Abb.2 Unterschiedliche Entfernungen  $r_{ik}$  zwischen Bildpunkten  $i$  und Mikrofonen  $k$  führen zu verschiedenen Verzögerungen, mit denen ein Signal eines Ortes (Bildpunktes) in unterschiedliche Kanäle eingeschrieben wird; Basis der Interferenztransformation

Da strikt im Zeitbereich gearbeitet wurde, konnten bereits 1996 erste, akustische Hochgeschwindigkeitsfilme (50.000 Bilder pro Sekunde) entstehen. Das sekundäre Wellenfeld konnte zeitaufgelöst betrachtet werden, was sich als enorme Hilfe herausstellte.

Auch bei MBB/Daimler [3] und beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gab es interessante Pionierarbeiten zu diesem Thema.

### 1. Prinzip der akustischen Bildgebung

Aus der Radar- und Ultraschalltechnik wie aus der Erderkundung sind ungezählte inverse Verfahren bekannt, deren Grundlage immer auf dem gleichen Prinzip beruht. Neben dem Global Positioning System (GPS) arbeiten Tsunami- oder Blitzwarnsysteme nach vergleichbaren Algorithmen.

Kennzeichen der GFal-Entwicklung ist die parallele Aufzeichnung der Zeitfunktionen mehrerer, in einem Array angeordneter Mikrofone (8...32, später bis 256), wobei die Mikrofone exakt vermessene Koordinaten haben.

Die Berechnung des akustischen Bildes geschieht dann im PC.

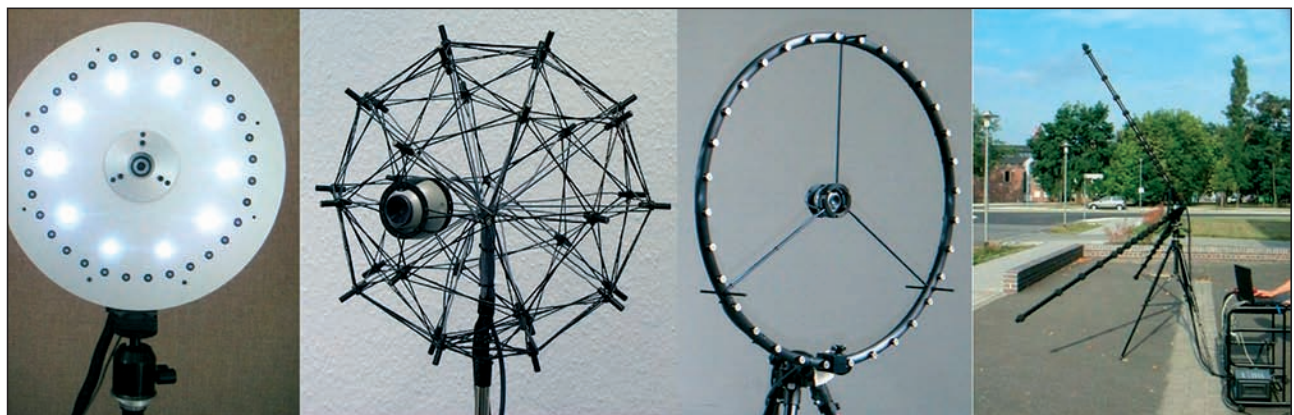
Wellen breiten sich in homogenen Medien etwa kugelförmig aus. Treffen Schallwellen verschiedener Orte auf ein Mikrofon, so entsteht ein Ausgangssignal als Superposition (summative Interferenz) der verschieden verzögerten Wellen, siehe Abb.2.

Grundidee der akustischen Bildgebung war es, diese Wellen zeitlich rückwärts zum Ausgangsort zu leiten, um sie dort wieder zur Interferenz zu bringen. 1993 führte ich für dieses Verfahren den Begriff der Interferenz-Rekonstruktion [4] ein.

Wir alle kennen das Prinzip von der optischen Abbildung: dort werden die Wellen von der Linse lauffzeitproportional verzögert. Sie interferieren zeitlich vorwärts und spiegelverkehrt auf einem Schirm.

Die Abbildung entsteht dort, wo Wellen in Eigeninterferenz (gleicher Wellenindex) zusammentreffen.

Der Unterschied zwischen Rekonstruktion und Projektion besteht dabei in der Bildausrichtung. Zeitlich vorwärts integriert (Optik) entsteht eine spie-



Disc	Cube	Ring	Star
32 Kanäle	32...120 Kanäle	28...120 Kanäle	36 Kanäle
Ø 35 cm	Ø 35 cm	Ø 35...75...140 cm	Ø 3 m
d = 30...100 cm	30...100 cm, 3-dim.	1...3 m	10...300 m

Abb.3: Arrays stehen für unterschiedlichste Anwendungen und Entfernungen (d) zur Verfügung, alle verfügen sie über eine integrierte Videokamera und identische Schnittstelle (MicBus). Die Arrayspezifikation wird mit einem speziellen File geladen

gelverkehrte Abbildung, zeitlich rückwärts integriert (virtuell) entstehen seitenrichtige Bilder oder Filme. Dieser Abbildungssatz wurde 1993 von mir wiederentdeckt und parallel in die neuronale wie in die akustische Welt [5] übersetzt.

## 2. Interferenzrekonstruktion

Der Momentanwert des Schalldrucks eines Bildpunkts wird bei der hier entwickelten und seit 1996 praktizierten Kartierung auf Äquivalenten Schalldruck (Equivalent Noise Pressure, ENP) mittels Interferenz-Rekonstruktion aus der Interferenzsumme der Schallpegel der Zeitfunktionen in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Bildpunkten und Mikrofonen gebildet.

Im Gegensatz zum sogenannten „beam forming“ [6] werden die Laufzeiten vom Objekt zum Mikrophon kompensiert. Zeitliche Integration liefert den Effektivwert des Schalldrucks für jeden Bildpunkt im betrachteten Intervall – das Interferenzintegral.

Betrachtungen zur Überbestimmtheit [7] zeigen Vorteile der Interferenzrekonstruktion im Gegensatz zu projektiven Ansätzen. Da sie negative Verzögerungen benötigt, wird eine numerische Berechnung zwingend. Auch gestattet sie es im Gegensatz zur Projektion, ohne Überbestimmtheit zu kompensieren. Vergleichbar zur Optik entsteht ein sekundäres Wellenfeld. Dieses läuft zeitlich einwärts, die Wellenfronten liegen im Innern der (Kugel-) Wellen. Die für mehrere Zeitpunkte entstehende Sekundärwelle

ist allerdings nicht zu verwechseln mit der ursprünglichen, vom Objekt kommenden Primärwelle. Lediglich die Interferenzintegrale beider Wellenfelder ähneln sich unter geeigneten Umständen (hohe Kanalzahlen). Dies gilt für (zeitprogressive) Projektion wie für (zeitinverse) Rekonstruktion gleichermaßen. Folglich ist auch eine optische Projektion (ein Bild) nur eine vergleichbare Approximation, auch hier steht nur das sekundäre, hinter der Linse entstehende Wellenfeld zur Verfügung, dessen Interferenzintegral gespiegelt erscheint.

## 3. Modulare Technik

Von 100 Hz (3,4 m) bis 100 kHz (3,4 mm) umfasst der hörbare Akustikbereich eine große Varianz von Wellen-

längen. Entsprechend sind an den Einsatzfall angepasste Arrays erforderlich. Modulare Arrays mit genormter Schnittstelle (MicBus) gestatten den Einsatz der Technik für unterschiedlichste Belange mit Objektgrößen und Entfernungen im Bereich von 30 cm bis 300 m.

Eine 1999 eingeführte automatische Bildüberlagerung der akustischen Karte auf das Kamerabild führt zu einer Besonderheit: Wir verwenden eine Videokamera mit Festobjektiv, Objektentfernung und Bildfeldgröße stehen damit in festem Zusammenhang. Damit ist es zur Gewinnung der physischen Koordinaten des Bildfeldes und der zu berechnenden Pixel nur nötig, die Objektentfernung manuell vorzugeben, der Rest geschieht auto-

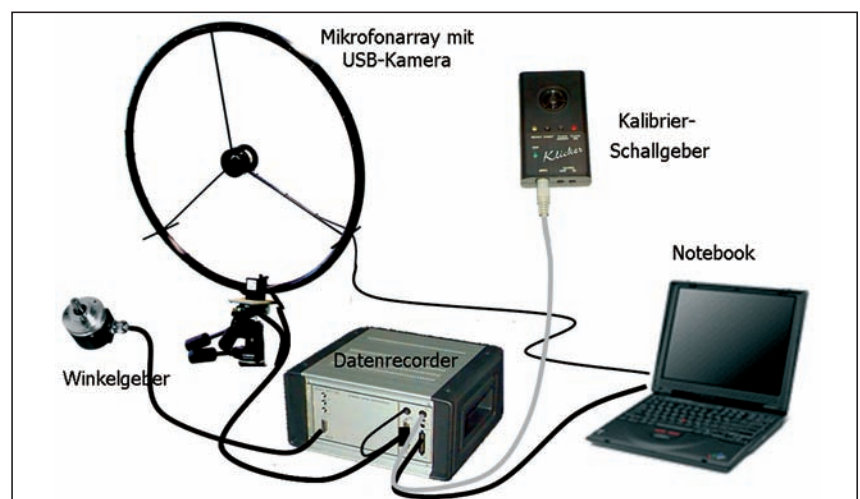


Abb. 4: Standard-System, bestehend aus Mikrofonarray, Datenrecorder, PC (Notebook) sowie Testschallgeber (Klicker). An einen digitalen Sondersignaleingang ist hier ein Drehgeber (IGR) angeschlossen



matisch. Entfernung und Objektgröße stehen dabei in festem und für die akustische Kartierung vorteilhaftem Zusammenhang.

Bislang sind alle Systeme zunächst mit einem (akustisch offenen) Ringarray ausgeliefert worden. Die Mikrofone sind kreisförmig in einer Ebene angeordnet. Sie lauschen nach vorn und hinten gleichermaßen. Das von hinten kommende Schallbild wird zum von vorn kommenden addiert. Folglich sind für die Applikation des Rings akustisch saubere Umgebungen ohne Reflektionen von hinten gefragt.

Für akustisch brisante Umgebungen stehen reflexive Arrays zur Verfügung, die das rückwärtige Schallfeld zerstö-

ren (Disc, Portable). Eine Zwischenstellung nehmen offene Arrays mit sphärisch angeordneten Mikrofonen ein (Cube, Star). Hier wird die Rückwärtsdämpfung über die räumliche Anordnung erreicht. Das Nebensprechen der Arrays ist auf den jeweiligen Einsatzfall optimiert. Die Mikrofonanordnung der Arrays definiert deren Fremdinterferenzverhalten (Nebenkeulen in der Ortskurve, Aliasing). Die hier entwickelten und patentierten Optimalformen (Ring, Star, Cube) bilden einen industrietauglichen Kompromiss zwischen guter Handhabbarkeit, geringem Aliasing und strahlenförmiger Geometrie der Ortskurve.

Diesem in der Akustik kaum diskutierten Umstand kommt hohe praktische Bedeutung zu. Das Array sollte möglichst keine autonomen Flecken in der Ortskurve ausbilden. Diese können zu Fehlinterpretationen der Bilder oder Filme führen.

Besonderer Wert kommt im industriellen Einsatz auch der schnellen Verfügbarkeit der Technik zu. Innerhalb von Minuten ist ein System aufgebaut, siehe Abb.4.

Aufgenommen werden gewöhnlich nur wenige Sekunden, der abgespeicherte Datensatz (\*.chl) enthält Videobild, Zeitfunktionen aller Kanäle, sämtliche Koordinaten von Mikrofonen und Videokamera sowie alle Initialisierungsparameter der Messung und des Recorders.

Damit ist es ohne zusätzliche Angaben möglich, eine Aufnahme in Japan zu machen, per Email nach Deutschland zu senden und hier in allen Variationen fehlerfrei zu berechnen.

Die Software ‚Noiselmage‘ gestattet die Berechnung von Standbildern, Filmen, Vorbeifahrtbildern sowie von Spektrogrammen.

Eine Vielzahl von Interaktionen zwischen Zeit, Frequenz und Raum eröffnet eine bislang unbekannte, neue Akustikwelt: in Sekundenschnelle sind Spektren von Emissionsorten ermittelt oder bandbegrenzte Analysen hergestellt.

Für Echtzeitanwendungen steht eine Live-Preview Option zur Verfügung, mit der es unter eingeschränktem Funktionsumfang möglich ist, Schallereignisse in Echtzeit zu beobachten. Kantenextraktion der Videobilder geschieht auf Knopfdruck, siehe Abb.7.

Für Auswertung und Dokumentation werden oft A-bewertete Bilder [8] be-

vorzugt. Hierfür werden die Zeitfunktionen gefiltert, die Bildgebung findet wieder im Zeitbereich statt.

#### 4. Applikationen

Haupt Einsatzgebiete liegen in der Autoindustrie. Von der Motorentwicklung, über die akustische Qualitätssicherung bis zum Karosseriebau sind unterschiedlichste Einsatzmöglichkeiten praktikabel. Aus dem Bereich der Baumaschinen stammen viele, spektakuläre Bilder, aber dieser Bereich wird ebenso wie der allgemeine Maschinenbau vorrangig von Dienstleistungszentren dominiert.

Eine Anzahl von Kameras befindet sich in der Konsum-Elektronik im Einsatz. Hier werden Notebooks, Drucker oder Plasma-Displays akustisch optimiert. Hausgeräteindustrie und Werkzeugmaschinenbauer profitieren hingegen vornehmlich von Dienstleistungszentren, da sich die Anschaffung einer Kamera nicht lohnt.

Obwohl kommerziell eher zweitrangig, gelangen mit dem Star-Array wohl die bislang bemerkenswertesten Aufnahmen. Flugzeuge, Hubschrauber, Züge oder Großbagger zählen zu den eindrucksvollsten Objekten.

#### 5. Literatur

- [1] <http://www.acoustic-camera.com/service.htm>
- [2] <http://www.gfai.de/~heinz/historic/akustik/radio/radio.htm>
- [3] [http://www.gfai.de/~heinz/publications/papers/2005\\_Wien.pdf](http://www.gfai.de/~heinz/publications/papers/2005_Wien.pdf)
- [4] <http://www.gfai.de/~heinz/publications/annualreports.htm>
- [5] Heinz, G.: Neuronale Interferenzen, siehe <http://www.gfai.de/~heinz/publications/NI/index.htm>
- [6] Johnson, D.H.; Dudgeon, D.E.: Array Signal Processing. Prentice Hall, 1993, Glg. 4.1
- [7] Heinz, G.: Neuronale Interferenzen, 1993 siehe <http://www.gfai.de/~heinz/publications/NI/index.htm>
- [8] ISO/DIS 10845, Akustik - Frequenzbewertung „A“ für Geräuschmessungen. Beuth Verlag Berlin

heinz@gfai.de

**Anmerkung der Redaktion:** Die „Akustische Kamera“ war für den Zukunftspreis des Bundespräsidenten 2005 nominiert.

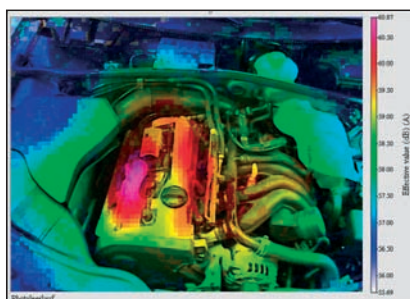


Abb. 5: A- bewertetes Schallbild eines PKW-Motors. Man erkennt Orte mit hohen Emissionswerten

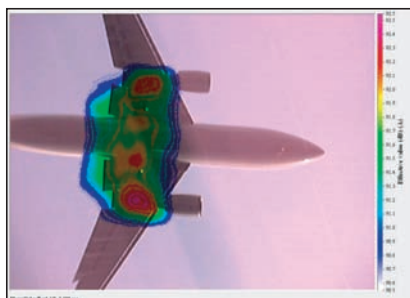


Abb. 6: Schallbild eines landenden Flugzeugs. Man erkennt Geräusche der Landeklappen

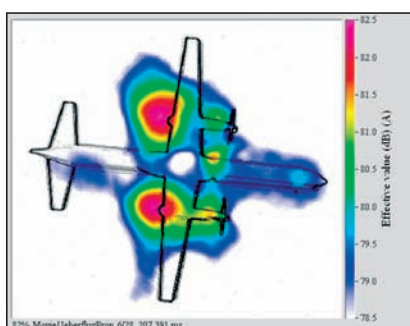


Abb. 7: Kantenextrahiertes Bild. Bei der Scheinemission seitlich am Rumpf handelt es sich wohl um eine Spiegelung der Druckwelle der Blätter der rechten Luftschraube.